Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 36, 2. 2025. (93-106)



Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir



Iron&Steel Society of Iran

Investigating the Performance of Silicon-Ethanol Soft Robot with a Focus on Heat Distribution Conditions

Research Article

Mahboubeh Ghasemzadeh.Namaghi[1], Hojat. Zamyad[2], Mohsen. Haddad.Sabzevar[3], Samaneh. Sahebian.Saghi[4]

DOI: 10.22067/jmme.2025.88021.1149

1- Introduction

Soft robots are a group of robots that usually made of polymer materials, have a completely flexible body, and can adapt to different conditions. Inspired by the biodiversity in nature, many efforts have been made to build soft robots to achieve unique features such as light weight, low cost, and high flexibility. Soft robots remarkable adaptability, sensitivity and agility. A major challenge in developing soft machines that reach their full potential is the creation of controllable soft bodies using materials that integrate sensors, actuators, and computing to enable these robots to perform the required behaviors .Phase change elastomer-material composite (PCMEC) actuators are composed of a fluid and soft elastomer matrix. This fluid is distributed in the form of micro-packages in the polymer matrix. As the temperature increases, the phase change in each package causes the matrix to expand. This class of actuators is promising candidates for soft robotic applications due to their high strain generation potential, low cost, and easy fabrication procedures. In the present study, a composite was constructed silicone as the matrix and ethanol as the phase change material. By applying an electrical voltage and passing a current through the wire, heat is generated. The activation and deformation mechanisms of the mentioned silicon-ethanol robot are the heat absorption of ethanol and the vapor pressure increase in the silicon matrix. Therefore, the uniformity of the heat distribution process in the composite is effective on its response speed.

2- Materials and Manufacturing Method

Two-component silicone (T25 China) and 96% ethanol (Merck, Germany) were used as raw materials. Nickel-chrome wire model Spark was selected from China were used to manufacture composite samples. Silicone and ethanol were thoroughly mixed in the optimal percentage by mechanical mixing, then hardener was added to the mixture and injected into a mold with a nickel-chrome coil in its central part. Finally, the mold was placed in a sealed container saturated with ethanol for 4 to 5 hours to cure the sample in an environment with a temperature below 20□ . To investigate the behavior of the composite actuators, a voltage was applied to each ends of a coil embedded centrally within the sample. When current passed through the coil, its resistance generated heat, which caused a phase change in the ethanol packages due to the heat distributed within the composite. The evaporation of ethanol produced the vapor pressure, leading to elastomer expansion and displacement. To record the displacement, the samples were photographed during the activation and release cycles. After that, the displacement of each sample was recorded using image processing codes in MATLAB software.

The pore sized and distribution within silicon matrix was examined after three working days (each working day included 10 activation and rest cycles) using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) with a German LEO device, model VP1450, operating voltage KV 20. Samples were completely dried at ambient temperature following cross-section cutting, and a thin layer of gold was applied to their surfaces.

3- Results and Discussion

Three samples with different coil diameters were examined according to Table 1. The difference of temperatures in the surface and core of CPCM0.5,

*Manuscript received July 26, 2024, Revised January 26, 2025, Accepted May 23, 2025.

[1] Master of Materials Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

[2] Assistant Professor, Department of Electrical and Biomedical Engineering, Faculty of Engineering, Khayyam University, Mashhad, Iran.

[3] Professor, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

[4] Corresponding Author: Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email**: S.Sahebian@um.ac.ir

CPCM0.8, and CPCM1 samples was recorded as 95℃, 25℃, and 21℃, respectively, during 30 working cycles. The average performance time of the CPCM0.5 sample increased from 120 seconds on the first day to 150 seconds on the third working day. While the performance of the other two samples was the same. The weight loss curve of the samples after three working days also shows that the CPCM1 sample with 55% residual ethanol in the structure had a more favorable performance (Figure 1).

Table 1) Information on manufactured samples

Sample	Coil diameter (cm)	Internal volume of the coil (cm^3)	Total sample volume (cm^3)	Volume fraction located inside the coil (%)
CPCM0.5	0.5	1.767	20.25	8.725
CPCM0.8	0.8	4.523	20.25	22.335
CPCM1	1	7.068	20.25	34.903

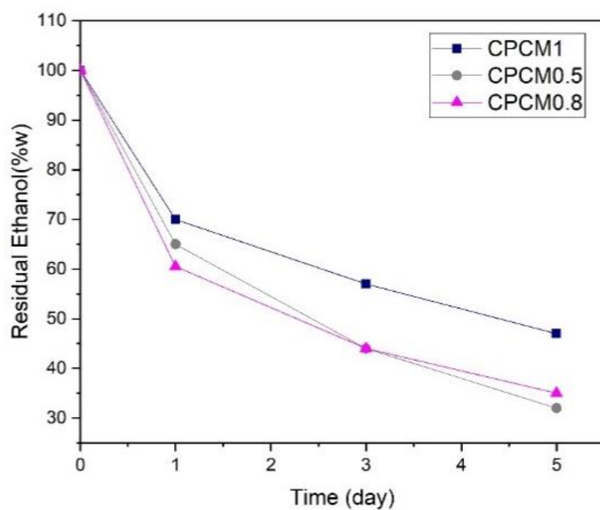


Figure 1) Residual ethanol content curve after each working day for three samples CPCM0.5, CPCM0.8 and CPCM1.

As the heat source in this type of robot is a nickel-chromium coil, the rate of heat transfer and temperature increase occurs faster near the coil. Therefore, the phase-change material near coil starts to change phase earlier and the areas far from the coil absorb heat later due to the insulating properties of the matrix. As a result, in some places the ethanol has changed its phase and created strain in the sample, while some places have not yet absorbed enough heat. This also increases the response speed until the appropriate strain is reached, in order to create sufficient heat at all points of the composite. Uniform heat distribution, providing better speed, also reduces weight loss. Therefore, using optimal heat transfer in the robot is very effective in creating better performance. This robot can have a longer lifespan without performance loss using uniform heat transfer.

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۶، ۲، ۱۴۰۴. (۱۰۶-۹۳)



مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی عملکرد ربات نرم سیلیکون-اتانول با تمرکز بر شرایط توزیع حرارت*

مقاله پژوهشی

محبوبه قاسم‌زاده نامقی[۱] حجت زامیاد[۲] محسن حداد سبزوار[۳] سمانه صاحبیان سقی[۴]


DOI: 10.22067/jmme.2025.88021.1149

چکیده در پژوهش حاضر یک ربات نرم کامپوزیتی با استفاده از سیلیکون به عنوان زمینه و اتانول به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، ساخته شد. هدف از ساخت این ربات نرم، ایجاد عملکرد کرنشی در ربات است. با توجه به اینکه مکانیزم فعال‌سازی ربات سیلیکون ـ اتانول، جذب حرارت توسط اتانول و ایجاد فشار بخار در زمینه سیلیکون و در نتیجه آن، کرنش است؛ بنابراین تأثیر یکنواختی توزیع حرارت در کامپوزیت بر سرعت پاسخ‌دهی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش با استفاده از تست تحریک الکتریکی، وزن‌سنجی با ترازو، تصویربرداری از ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی (FESEM) و پردازش تصاویر مربوط به جابه‌جایی نمونه‌ها توسط نرم‌افزار متلب، نشان داد شرایط توزیع حرارت در کامپوزیت سیلیکون ـ اتانول در سرعت عملکرد و طول عمر کامپوزیت بسیار با اهمیت است. نمونه با قطر سیم‌پیچ ۱ سانتی‌متر (برابر با ۳۴ درصد حجمی از نمونه که داخل سیم‌پیچ قرار گرفته به حجم کل نمونه) دارای ثبات عملکردی در طی سیکل‌های مختلف در زمان عملکرد بود. اختلاف دماهای مرکز و سطح نمونه برابر حدود ۲۱°C بود و میانگین زمان پاسخ‌دهی طی سه روز کاری برابر با ۱۶۱ ثانیه به دست آمد. برای نمونه با قطر سیم‌پیچ ۰/۸ سانتی‌متر میزان اختلاف دمای سطح و مرکز 25 °C و میانگین زمان پاسخ‌دهی طی سه روز کاری ۱۶۵ ثانیه بود. در نمونه با قطر سیم‌پیچ ۰/۵ سانتی‌متر میزان اختلاف دمای سطح و مرکز ۹۵°C و میانگین زمان پاسخ‌دهی طی سه روز کاری، ۱۴۳ ثانیه اندازه‌گیری شد.

واژه‌های کلیدی محرک نرم، سیلیکون، ماده تغییر فاز دهنده، انتقال حرارت.

Investigating the Performance of Silicon-Ethanol Soft Robot with a Focus on Heat Distribution Conditions

Mahboubeh Ghasemzadeh Namaghi Hojat Zamyad Mohsen Haddad Sabzevar Samaneh Sahebian saghi

Abstract *In the present study, a composite soft robot was constructed using silicon as the matrix and ethanol as the phase change material. The purpose of constructing this soft robot is to create strain performance in the robot. Given that the activation mechanism of the silicon-ethanol robot is the absorption of heat by ethanol and the creation of vapor pressure in the silicon matrix and, as a result, strain; therefore, the effect of the uniformity of heat distribution in the composite on its response speed was investigated. The results of this study, using electrical excitation testing, weighing with a balance, imaging of the microstructure by electron microscopy (FESEM), and processing of images related to the displacement of the samples by MATLAB software, showed that the heat distribution conditions in the silicon-ethanol composite are very important in the performance speed and life of the composite. The sample with a coil diameter of 1 cm (equal to 34% of the volume of the sample placed inside the coil to the total volume of the sample) had stable performance during different cycles during operation. The difference in temperature between the center and surface of the sample was approximately 21°C, and the average response time over three working days was 161 seconds. For the sample with a coil diameter of 0.8 cm, the difference in temperature between the surface and the center was 25°C, and the average response time over three working days was 165 seconds. For the sample with a coil diameter of 0.5 cm, the difference in temperature between the surface and the center was 95°C, and the average response time over three working days was 143 seconds.*

Keywords soft actuator, silicone, phase change material, heat transfer.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۳/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۳/۳ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۲) استادیار، دکتری، گروه برق و مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه خیام، مشهد.

(۳) استاد، گروه مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۴) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

Email: S.Sahebian@um.ac.ir

مقدمه

ربات‌های نرم دسته‌ای از ربات‌ها هستند که بدنه‌ای کاملا منعطف و قابل انطباق با شرایط مختلف را دارند و معمولا از مواد پلیمری ساخته می‌شوند. این ربات‌ها به طور قابل توجهی در زمینه‌های مختلفی مانند نظامی، پزشکی، اکتشاف، حمل و نقل و حتی استفاده شخصی و خانگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با الهام از تنوع زیستی در طبیعت، تلاش‌های زیادی برای ساخت ربات‌های نرم انجام شده تا ویژگی‌های منحصر به فردی مانند سبک وزنی، هزینه کم و انعطاف‌پذیری بالا در ربات حاصل شود. در مقایسه با ربات‌های صلب که تغییر شکل پذیر نیستند، ربات‌های نرم می‌توانند با تغییر شکل‌های متنوع در صورت مواجهه با موانع به راحتی از آن عبور کنند و شکل خود را برای دسترسی به محیط تغییر دهند [1-3].

ایجاد انطباق با محیط اطراف در سیستم‌های رباتیک به آرامی در طی چندین دهه رشد کرده است. ظهور رباتیک نرم در سال ۱۹۵۸ اتفاق افتاد؛ وقتی که مک کیبین (McKibben) برای دختر فلج خود یک ارتز دستی نرم با ماهیچه مصنوعی ساخت. در دهه ۲۰۰۰، رباتیک الهام گرفته شده از محیط زیست، تبدیل به زیربنای رباتیک نرم شد و اصول دنیای طبیعی را در طراحی ربات‌ها ادغام کرد [4,5]. ویژگی‌های موجودات زنده، مهندسان و محققان را برانگیخته است تا عناصر الهام گرفته از طبیعت را در ساختارهای رباتیک خود ادغام کنند و ربات‌ها را به توانایی تعامل سازگار با محیط‌های غیر قابل پیش‌بینی و ناشناخته مجهز کنند [3].

برای طراحی ربات‌های نرم، طیف گسترده‌ای از مواد نرم از جمله محرک‌های الاستومری دی‌الکتریک (Dielectric elastomer actuators (DEAs)) [2]، هیدروژل‌ها [6]، کامپوزیت‌های پلیمر ـ فلز حافظه‌دار (Shape memory alloy(SMA)) [7]، کامپوزیت‌های مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده [5,8] و پلیمرهای الکترواکتیو (electroactive polymer (EAP)) [9] مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله روش‌های فعال‌سازی ربات‌های نرم می‌توان به فعال‌سازی هیدرولیکی یا پنوماتیکی، فعال‌سازی الکترواستاتیک/ الکتروشیمیایی حرارتی، فعال‌سازی مغناطیسی و بیوهیبریدی اشاره کرد [10]. اکثر روش‌های فعال‌سازی معمولا انرژی زیادی مصرف می‌کنند و اغلب به تجهیزات اضافی یا محیط‌های مرطوب نیاز دارند که باعث محدودیت در کاربری آن‌ها می‌شود [11].

در واقع اکثر روش‌های فعال‌سازی موجود دارای محدودیت‌های ذاتی هستند. به عنوان مثال، پلیمرهای حافظه‌دار کرنش‌های کمی (کمتر از ۱۰ درصد) را ایجاد می‌کنند. پلیمرهای دی الکتریک معمولا به ولتاژ محرکه بزرگی در حدود چند کیلوولت نیاز دارند. محرک‌های مغناطیسی نیز به موتورها و مجموعه بزرگی از ماشین‌آلات نیاز دارند. محرک‌هایی که فعال‌سازی آن‌ها بر اساس انرژی پنوماتیکی یا هیدرولیکی است، با ایجاد یک جابه‌جایی بزرگ در زمان کوتاه، امیدوارکننده‌ترین محرک‌ها هستند اما نیاز به سیستم‌های تولید فشار دارند که دارای ابعادی بزرگ هستند و کوچک‌سازی آن‌ها دشوار است [12]. محرک‌های مکانیکی که محرک‌های خارجی، از جمله گرما، نور، جریان الکتریکی، pH، رطوبت و میدان مغناطیسی را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کنند، اجزای ضروری در موتورهای مدرن با طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله ربات‌ها، ماهیچه‌های مصنوعی، و سیستم‌های میکروالکترو مکانیکی هستند. از زمان بهبود موتور بخار توسط وات، تغییر قابل توجه در حجم یا شکل مواد ناشی از تبدیل فاز، یکی از مهم‌ترین نیروهای محرک عملگرها بوده است [13].

محرک‌های کامپوزیتی الاستومر ـ ماده تغییر فاز دهنده (Phase change material Elastomer Composite(PCMEC)) (PCMEC) از زمینه الاستومری نرم و سیال تشکیل شده‌اند. این سیال به صورت میکروحباب‌ها در زمینه توزیع شده است. هنگام افزایش دما، تغییر فاز در هر حباب سبب انبساط زمینه می‌شود. این دسته از محرک‌ها به دلیل پتانسیل بالا برای ایجاد کرنش، هزینه کم و ساخت آسان، برای کاربردهای رباتیک نرم امیدوار کننده هستند. زمینه الاستومری و مواد مورد استفاده در این ربات‌ها بر قابلیت‌های مکانیکی محرک‌های PCMEC تأثیرگذار است [14].

سیلیکون الزامات عملکرد را برای برنامه‌های محرک نرم برآورده می‌کند، زیرا دارای پایداری حرارتی و شیمیایی عالی است. قابلیت ارتجاعی بسیار بالا، خزش کم، پایداری حرارتی مطلوب در گستره دمایی (۵۰- تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد)، عمر طولانی، برگشت‌پذیری خوب و قابلیت تغییر شکل در کشش، فشار و خمش و از همه مهم‌تر شباهت خواص مکانیکی آن با ماهیچه انسان سبب شده تا در ساخت ربات‌های نرم توجه ویژه‌ای به آن شود.

Gilles Decroly و همکارانش [14] در پژوهشی مربوط به استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در رباتیک نرم، به بررسی تأثیر نوع ماده تغییر فاز دهنده مایع در زمینه سیلیکون پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که انتخاب یک سیال مناسب می‌تواند کرنش و سرعت عملکرد را افزایش دهد و استفاده از مایع مبتنی بر فلوئور Novec باعث کاهش دمای تحریک به ۳۴°C می‌شود. Kapłon و همکارانش [17,18] از اتانول به عنوان PCM در ساخت ربات نرم استفاده کردند. آن‌ها یک کامپوزیت نرم با استفاده از ماده اولیه سیلیکون و اتانول ساختند و در مبانی تئوری خود به بررسی فشار بخار اشباع اتانول در دمای محیط و در دمای تبخیر اتانول پرداختند. همچنین تأثیر عواملی مانند درصد حجمی بهینه فاز اتانول در سرعت عملکرد و جابه‌جایی نیز مورد بررسی قرار گرفت و نشان دادند که با افزایش درصد حجمی فاز مایع تا مقدار ۳۰ درصد، عملکرد ماده به مقدار مطلوب می‌رسد.

Kang و همکاران [19] ترکیبی از ماتریس نرم الاستومر سیلیکونی و یک تشک نانوفیبر پلی اکریلونیتریل (PAN) آغشته به اتانول تعبیه شده در زمینه سیلیکون را ساختند. در این کار از تحریک حرارتی اتانول محصور شده در لایه نانوالیاف الکتروریسی شده که به طور نامتقارن در زمینه انعطاف‌پذیر سیلیکون تعبیه شده است، استفاده و گزارش کردند که عملکرد یک محرک به عواملی مانند شرایط عملیاتی (انرژی حرارتی اعمال شده) و تعداد لایه‌های غیرفعال بستگی دارد.

از آنجایی که قابلیت انطباق با شرایط برنامه‌ریزی شده برای یک ربات بسیار حائز اهمیت است، لذا بایستی نوع عملکرد ربات به صورتی قابل اطمینان باشد و مدت زمان پاسخگویی و میزان کرنش مد نظر در زمان تعریف شده اتفاق بیفتد تا بتوان از نظم ساختاری موجود در ربات برای کارایی مد نظر بهره گرفت. در این پژوهش با توجه به اهمیت منبع حرارتی در عملکرد عملگر نرم، کامپوزیت سیلیکون ـ اتانول، با تکیه بر انتخاب شرایط بهینه انتقال حرارت ساخته شده است. گرما به کمک سیم‌پیچ مقاومتی از جنس نیکل ـ کروم به کامپوزیت اعمال شد. چهار قطر متفاوت سیم‌پیچ در نمونه‌سازی لحاظ شد تا بهینه‌سازی پارامترهای سیم‌پیچ تعبیه شده در کامپوزیت انجام شود. با بررسی میزان عیوب ایجاد شده در ریزساختار، میزان افت وزن و یکنواختی عملکرد نمونه طی سیکل‌های کاری متعدد نیز بهترین شرایط مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد

مواد مورد استفاده در ساخت نمونه‌های پژوهش حاضر شامل سیلیکون دوجزئی (حاوی رزین سیلیکون و هاردنر) مدلT25 تهیه شده از چین، اتانول ۹۶٪ تهیه شده از شرکت مرک آلمان و سیم نیکل ـ کروم مدل اسپارک تهیه شده از چین می‌باشد.

روش نمونه‌سازی

با توجه به اینکه توصیف و پیش‌بینی رفتار محرک‌های نرم فعال شده با مواد تغییر فاز دهنده بسیار وابسته به جذب حرارت از منبعی حرارتی است. بنابراین در ساخت کامپوزیتی که ماده تغییر فاز دهنده آن با تغییر فاز از حالت مایع به بخار تبدیل می‌شود و امکان خروج آن از ساختار بسیار محتمل است. رعایت اصول مربوط به یکسان‌سازی شرایط ساخت و یکسان‌سازی شرایط انتقال حرارت به تمامی نواحی نمونه بسیار حائز اهمیت است. ابتدا سیلیکون و اتانول به روش اختلاط مکانیکی با همزن دستی به طور کامل با یکدیگر مخلوط شدند. درصد بهینه اتانول با توجه به حداکثر میزان قابلیت اختلاط اتانول در سیلیکون، به روش تجربی و معادل با ۲۵ درصد وزنی انتخاب شد. انتخاب درصد وزنی مذکور با در نظر گرفتن دو عامل کلیدی غنی شدن ساختار سیلیکون از اتانول و اختلاط کامل اتانول در بستر سیلیکون و ایجاد ساختاری یکنواخت از سیلیکون ـ اتانول تعیین شد.

در گام بعد هاردنر به مخلوط اضافه شده و مخلوط نهایی به قالبی که از قبل با قرار دادن سیم پیچ نیکل ـ کروم در قسمت مرکزی آن آماده شده است، با استفاده از یک سرنگ تزریق گردید. سپس قالب در ظرف در بسته‌ای اشباع از اتانول به مدت ۴ تا ۵ ساعت برای پخت نمونه در محیطی با دمای کمتر از ۲۰ °C قرار گرفت. سیم‌پیچ‌های نیکل ـ کروم از سیم به طول ۱۲۰ سانتی متر با قطرهای ۰/۵ ، ۰/۸ و ۱ سانتی‌متر در ساخت نمونه کامپوزیتی استفاده شد. شماتیکی از مدل قالب در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱ مدل قالب و سیم‌پیچ و سنسور دمای مرکزی جانمایی شده در قالب (ابعاد قالب:cm^3 ۱/۵×۱/۵×۹)

مشخصه‌یابی

به منظور بررسی عملکرد محرک‌های کامپوزیتی، با اعمال ولتاژ به دو سر سیم‌پیچ تعبیه شده در قسمت مرکزی نمونه و عبور جریان از سیم‌پیچ، حرارت ناشی از مقاومت سیم‌پیچ ایجاد شد. حرارت با توزیع در سراسر نقاط کامپوزیت باعث تغییر فاز بسته‌های اتانول شده و در نتیجه تولید فشار بخار ناشی از تبخیر اتانول، انبساط الاستومر و جابه‌جایی در قطعه حاصل شد. میزان جابه‌جایی مد نظر برای این نمونه‌ها به مقدار ۲۲ درصد طول اولیه بود. با رسیدن نمونه به این میزان جابه‌جایی، سیکل گرمایش قطع و نمونه تا رسیدن به طول اولیه و دمای مرکزی حدود°C۳۵-۴۰ تحت سیکل استراحت قرار می‌گیرد. تمامی نمونه‌ها با توان یکسان ۱۶ وات توسط منبع تغذیه مدل .LEADER LSP-156 مورد ارزیابی قرار گرفتند.

حین اعمال ولتاژ به نمونه‌ها، به کمک دوربین وبکم Genius مدل FaceCam1000x با عکس‌برداری لحظه‌ای، میزان جابه‌جایی نمونه‌ها ثبت شده است و تصاویر حاصل در نرم‌افزار متلب مورد پردازش قرار گرفته است. به منظور بررسی شیب حرارتی ایجاد شده در نمونه با استفاده از سنسور دمایی نوع PT1000 تعبیه شده در قسمت مرکزی و سطح نمونه، میزان تغییرات دما حین دوره تحریک و استراحت نمونه‌ها نیز ثبت شده است.

بررسی اندازه حفرات ایجاد شده در نواحی مختلف ساختار بعد از سه روز کاری (هر روز کاری شامل ۱۰ سیکل تحریک و استراحت) توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM,MIRA3TESCAN) تحت ولتاژ شتاب دهنده 10kV انجام شد. به این منظور تمامی نمونه‌ها با ضخامتی در حدود ۲ از سطح مقطع عرضی برش زده شده و در هوای آزاد قرار گرفتند تا اتانول به طور کامل از ساختار خارج شود، سپس با طلا پوشش داده شدند.

نتایج و بحث

ارزیابی حرارتی

با طراحی سیم‌پیچ‌ها با قطرهای مختلف، برای هر نمونه المان حرارتی متفاوتی حاصل می‌شود. حجمی از نمونه که در قسمت داخلی سیم‌پیچ قرار می‌گیرد به حجم کل نمونه، یکی از پارامترهای کلیدی در تعیین میزان یکنواختی یا عدم یکنواختی در انتقال حرارت از سیم‌پیچ به حجم نمونه است زیرا حجمی از ماده که در داخل سیم‌پیچ قرار می‌گیرد تحت گرمایشی استوانه‌ای از تمام جداره‌های اطراف سیم‌پیچ به سمت مرکز کامپوزیت است ولی نواحی بیرون سیم‌پیچ از یک سمت حرارت سیم‌پیچ را دریافت می‌کنند و از سمت سطح نمونه با هوای محیط اطراف در ارتباط هستند. بنابراین ایجاد تعادل در انتقال حرارت در قسمت مرکزی نمونه و نواحی نزدیک به سطح بسیار مهم است. در جدول (۱) مشخصات هر نمونه با توجه به اندازه منبع حرارتی و کسری از نمونه که در قسمت داخلی سیم پیچ قرار گرفته ذکر شده است.

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های کامپوزیتی با توجه به قطر منبع حرارتی

نمونه	قطر سیم‌پیچ (cm)	حجم داخلی سیم‌پیچ(cm^3)	حجم کل نمونه(cm^3)	کسر حجمی قرار گرفته در قسمت داخلی سیم پیچ(٪)
CPCM0.5	۰/۵	۱/۷۷	۲۰/۲۵	۸/۷۳
CPCM0.8	۰/۸	۴/۵۲	۲۰/۲۵	۲۲/۳۴
CPCM1	۱	۷/۰۷	۲۰/۲۵	۳۴/۹۰

در توصیف شرایط انتقال حرارت از سیم‌پیچ به نمونه می‌توان سیم‌پیچ را یک استوانه حرارتی با قطر مشخص در نظر گرفت. حجمی از ماده که در داخل سیم‌پیچ محصور شده در یک استوانه حرارتی است که از دیواره‌های سیم‌پیچ به صورت عرضی و از تمام جهات حرارت را جذب کند. اما نواحی بیرونی سیم‌پیچ از یک سمت با منبع حرارتی و از سمت دیگر با هوا در تماس هستند. بدیهی است که در نواحی بیرونی سیم‌پیچ انتقال حرارت کندتر صورت پذیرد. علاوه بر این، در نمونه CPCM0.5 تنها ۸/۷٪ از حجم کل نمونه در قسمت داخلی سیم‌پیچ قرار گرفته و انتظار می‌رود انتقال حرارت و افزایش دما در مرکز این نمونه بسیار سریع اتفاق بیفتد. اما در نواحی بیرونی سیم‌پیچ که حجم بیشتری از کل ماده را در برگرفته است، فاصله بیشتری از منبع حرارتی وجود دارد و انتظار می‌رود انتقال حرارت به سطح نمونه کندتر انجام پذیرد. در نمونه CPCM0.8، حجمی برابر با ۲۲/۳۴٪ از کل نمونه در داخل سیم‌پیچ قرار دارد و در واقع با افزایش قطر سیم‌پیچ و افزایش حجم ماده‌ای که در داخل آن قرار گرفته، سرعت انتقال حرارت در ناحیه مرکزی کندتر و در مقابل با کاهش فاصله سیم‌پیچ از سطح نمونه، انتقال حرارت به نواحی بیرونی تا سطح نیز با سرعت بهتری انجام پذیرد. نتیجه این امر کاهش اختلاف دمای مغز و سطح بیرونی قطعه خواهد بود. در نمونه CPCM1، حجمی برابر با ۳۴/۹۰٪ از حجم کل نمونه محصور شده در استوانه حرارتی است و فاصله سیم‌پیچ تا سطح نمونه برابر با ۰/۲۵سانتی‌متر است و انتظار می‌رود با کوتاه شدن این فاصله انتقال حرارت در نواحی بیرونی سیم‌پیچ سریع‌تر اتفاق بیفتد و از طرفی در ناحیه داخلی سیم‌پیچ به دلیل بزرگ‌تر بودن قطر سیم‌پیچ انتقال حرارت با نرخ سرعت مناسبی صورت پذیرد و از تمرکز حرارتی زیاد در مغز نمونه کاسته شود.

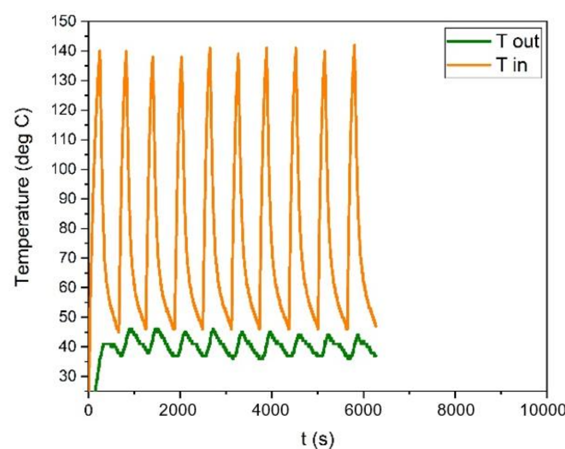
به طور کلی میزان انتقال حرارت و افزایش دما در نزدیک به سیم‌پیچ سریع‌تر رخ می‌دهد و در این نقاط ماده تغییر فاز دهنده زودتر شروع به تغییر فاز می‌کند و در مقابل نواحی دور از سیم‌پیچ به سبب عایق بودن سیلیکون دیرتر گرما را جذب می‌کنند و بنابراین بعضی نقاط آماده تغییر فاز و ایجاد کرنش در نمونه هستند و بعضی نقاط هنوز به میزان کافی حرارت را جذب نکرده‌اند. این موضوع باعث می‌شود برای ایجاد حرارت کافی در تمام نقاط کامپوزیت، سرعت پاسخ‌دهی تا رسیدن به کرنش مناسب نیز افزایش یابد.

نمودارهای دمایی نمونه‌ها در شکل (۲) آمده است. اختلاف دمای زیادی بین سطح و مغز نمونه CPCM0.5 به دلیل تمرکز حرارتی در قسمت مرکزی نمونه و عدم انتقال حرارت صحیح در حجم نمونه است. به گونه‌ای که دمای مغز نمونه تا رسیدن به کرنش ۲۲٪، به دمای بیشتر از ۱۳۰°C افزایش یافته و دمای سطح نمونه در حدود ۴۵ °C است. در واقع وجود تفاوت در نرخ انتقال حرارت به نقاط مختلف نمونه CPCM0.5 باعث ایجاد شیب حرارتی بین سطح و مرکز نمونه می‌شود. با توجه به عملکرد نمونه وابسته به انتقال حرارت در تمامی نقاط آن، دمای مرکز نمونه تا حدود ۴۵°C بیشتر از دمای جوش اتانول (۷۸°C) افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان افت وزن در اثر افزایش دمای نمونه تشدید می‌شود. محرک سیلیکونی با افزایش دما بیشتر از دمای جوش اتانول دچار شوک حرارتی می‌شود و اگر چه در سیکل‌های کاری اولیه روند پاسخ‌دهی سریع‌تری از خود نشان می‌دهد، اما طی سیکل‌های متعدد و در روز دوم و روز سوم کاری (هر روز کاری شامل ۱۰ سیکل تحریک و استراحت است) نمونه دچار افت عملکرد بیشتری (افزایش زمان تحریک) شده و کاهش وزن قابل توجهی در نمونه مشاهده می‌شود (شکل ۴). ذکر این نکته ضروری است که روند عملکردی قطعه دچار تغییرات بیشتری به سایر نمونه‌ها است.

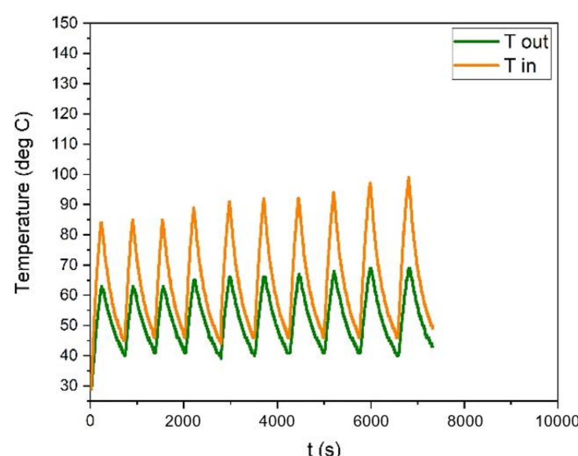
اما در نمونه CPCM0.8 و CPCM1 که نمودارهای دمای آن‌ها در شکل (۲-ب) و (۲-ج) آمده است، تفاوت در دمای مغز و سطح نمونه کاهش یافته و حداکثر دمای مرکز نمونه تا حدود دمای جوش اتانول افزایش یافته است. کاهش میزان اختلاف دمای مرکز و سطح نمونه به معنی ایجاد شرایط یکنواخت در انتقال حرارت از منبع حرارتی (سیم‌پیچ) به نواحی مختلف کامپوزیت است. از مقایسه بین نمودارهای دمای مرکز و سطح سه نمونه می‌توان مشاهده کرد که در نمونه CPCM1 کمترین میزان اختلاف دمای مرکز و سطح نمونه وجود دارد. نکته مهم دیگر آنکه در نمونه CPCM0.5 تغییر شکل نمونه معطوف به بخش مرکزی بوده اما با افزایش قطر سیم‌پیچ، حرارت علاوه بر مرکز نمونه بهتر به سطح منتقل می‌شود و سطح نمونه‌ها افزایش دمایی را در طی سیکل کاری حس می‌کنند که نشان دهنده تأثیر شرایط انتقال حرارت می‌باشد.

میزان اختلاف دمای مغز و سطح سه نمونه CPCM0.5، CPCM0.8 و CPCM1 به ترتیب برابر با میانگین دمایی ۹۵°C،

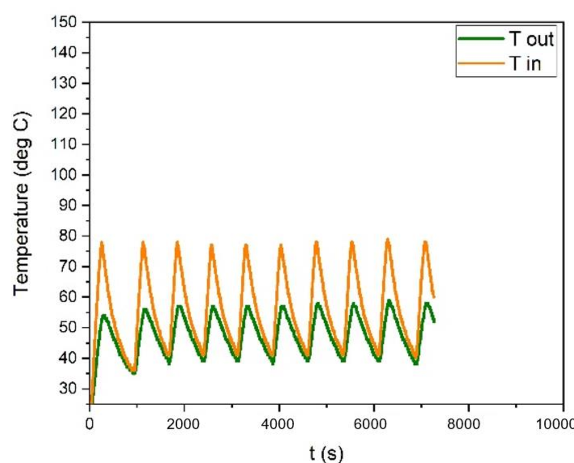
۲۵ °C و ۲۱°C طی ۳۰ سیکل کاری ثبت شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ نمودارهای دمای مرکز و سطح نمونه کامپوزیتی طی ده سیکل تحریک و استراحت (روز کاری دوم): (الف) نمونهCPCM0.5، (ب) نمونهCPCM0.8 ، (ج) نمونهCPCM1

ارزیابی عملکردی

با توجه به اینکه طول عمر محرک نرم ساخته شده در این پژوهش تحت تأثیر عواملی از جمله دما، مدت زمان اعمال توان به نمونه و یکنواختی انتقال حرارت در تمام نقاط کامپوزیت است؛ بنابراین توصیف رفتار این نمونه‌ها تابعی از عوامل محیطی و ساختاری می‌باشد [20]. در نتیجه لازم است برای انتخاب بهترین نمونه از نظر عملکرد، عواملی مانند زمان تحریک، شیب افت وزن طی روزهای کاری متعدد، یکنواختی ریزساختار و میزان عیوب بعد از سیکل‌های کاری متعدد و میزان یکنواختی توزیع حرارت مورد بررسی قرار گیرد. در نمودار شکل (۳) میانگین زمان تحریک سه نمونه برای هر روز کاری نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود روند پاسخ‌دهی نمونه CPCM1 یکنواخت بوده و تفاوت چندانی در زمان پاسخ‌دهی این نمونه در سه روز کاری مشاهده نمی‌شود. ولی نمونه CPCM0.5 در روز اول در میانگین زمانی ۱۲۰ ثانیه و در روز سوم در زمانی حدود ۱/۲۵ برابر زمان روز اول (۱۵۰ ثانیه) به جابه‌جایی مطلوب رسیده است و در واقع در این نمونه روند یکنواختی در پاسخ‌دهی طی سیکل‌های کاری متعدد مشاهده نمی‌شود. علت این موضوع وجود تمرکز حرارتی در مغز نمونه است که در طی سیکل‌های اول که نمونه اشباع از اتانول است، به سرعت به کرنش مطلوب می‌رسد ولی در طی سیکل‌های کاری بیشتر، نمونه قابلیت عملکرد سریع خود را به دلیل ایجاد عیوب ریزساختاری و افت میزان اتانول (شکل ۴ و شکل ۷) موجود در ساختار از دست می‌دهد.

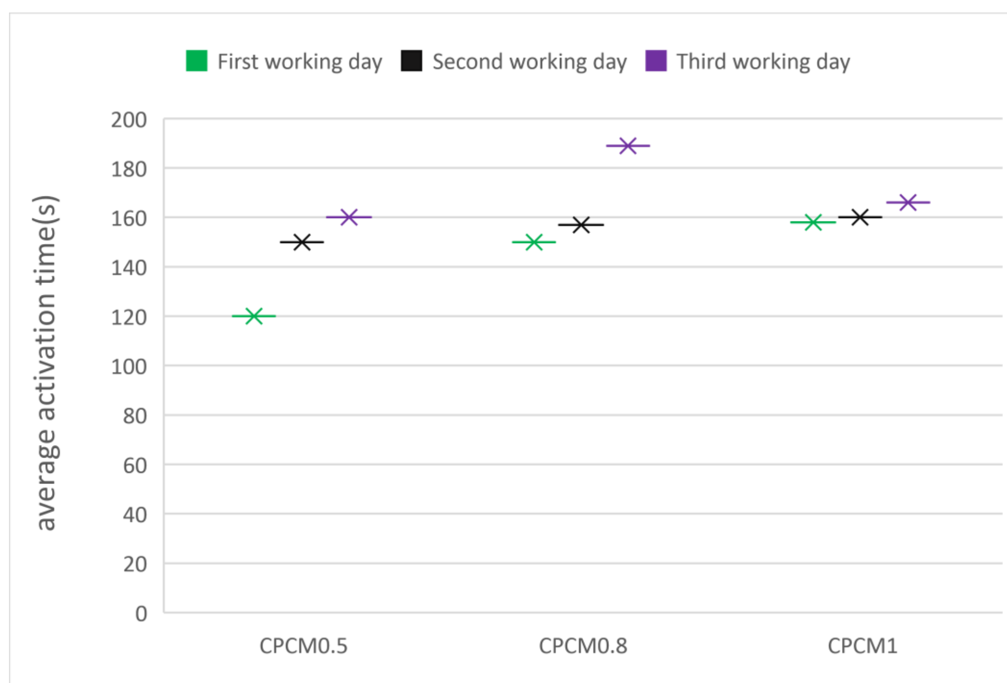
درصد اتانول باقی مانده در ساختار نیز پس از هر دوره کاری مورد بررسی قرار گرفت. در نمودار شکل (۵) میزان اتانول باقی مانده در ساختار قابل مشاهده است. نمونه CPCM0.5 پس از پایان دوره کاری میزان عملکرد مطلوب و افت وزن کمی دارد ولی در دوره کاری دوم و سوم میزان اتانول باقی مانده در ساختار با سایر نمونه‌ها برابری می‌کند. در واقع با وجود اینکه این نمونه پس از روز کاری اول مقدار بیشتری اتانول در ساختار دارد اما از نظر میانگین زمان عملکرد و سرعت پاسخ‌دهی تفاوت زیادی با نمونه CPCM1 ندارد و برعکس آن نمونه CPCM1 به دلیل اینکه شرایط مطلوب‌تری از نظر منبع حرارتی دارد، در هر سه دوره

کاری عملکردی یکنواخت از خود نشان می‌دهد و طی تمام سیکل‌های کاری با وجود اینکه میزان اتانول باقی مانده در ساختارش مقداری کمتر از نمونه CPCM0.5 است ولی از نظر زمان پاسخ‌گویی شرایطی مشابه در هر سه روز کاری نشان می‌دهد. ضمن اینکه به سبب تجربه دماهای پایین‌تر در مغز نمونه CPCM1 چگالی و ابعاد عیوب نسبت به نمونه CPCM0.5 کمتر بوده است (شکل ۶ و ۷). در یک کار مشابه، ابراهیمی و همکارانش [21] میانگین زمان عملکرد نمونه‌ها با استفاده از توان کاری ۱۵ وات را طی سه روز کاری گزارش کردند. اطلاعات آن‌ها نشان می‌دهد از روز اول کاری تا روز سوم کاری، زمان عملکرد ۳ برابر افزایش داشته است و در روز کاری سوم، زمان عملکرد به مقدار ۱۰۰۰۰ ثانیه رسیده است.

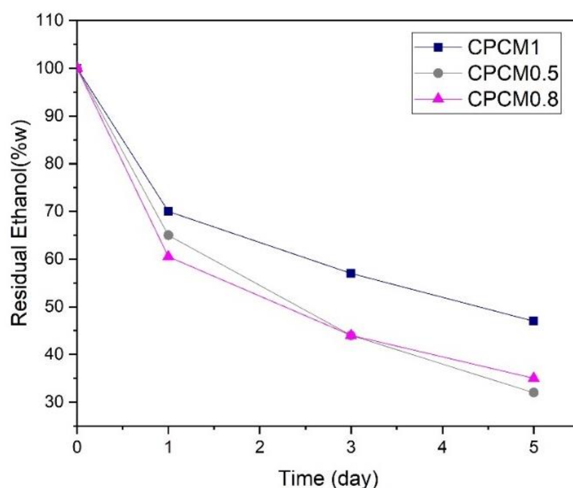
از آنجایی که برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد یک ربات نرم لازم است ربات به طور قابل اطمینانی به عملکرد مورد نیاز پاسخ دهد و در مواجهه با شرایط مد نظر بتواند رفتار مورد انتظار را نشان دهد، لذا یکنواختی عملکرد ربات طی سیکل‌های کاری متعدد بسیار حائز اهمیت است.

اگرچه در مواردی که نیاز به پاسخ‌گویی و عملکرد محدود وجود دارد، یعنی تعداد سیکل کاری کمی از نمونه مورد انتظار است، می‌توان از رباتی با شرایط نمونه CPCM0.5 استفاده کرد اما باید در نظر داشت که تخریب ساختاری در چنین حالتی شدید است و نمی‌توان بر عملکرد قابل انطباق با شرایط تعریف شده در سیکل‌های کاری با تعداد زیاد، از این نمونه انتظار داشت.

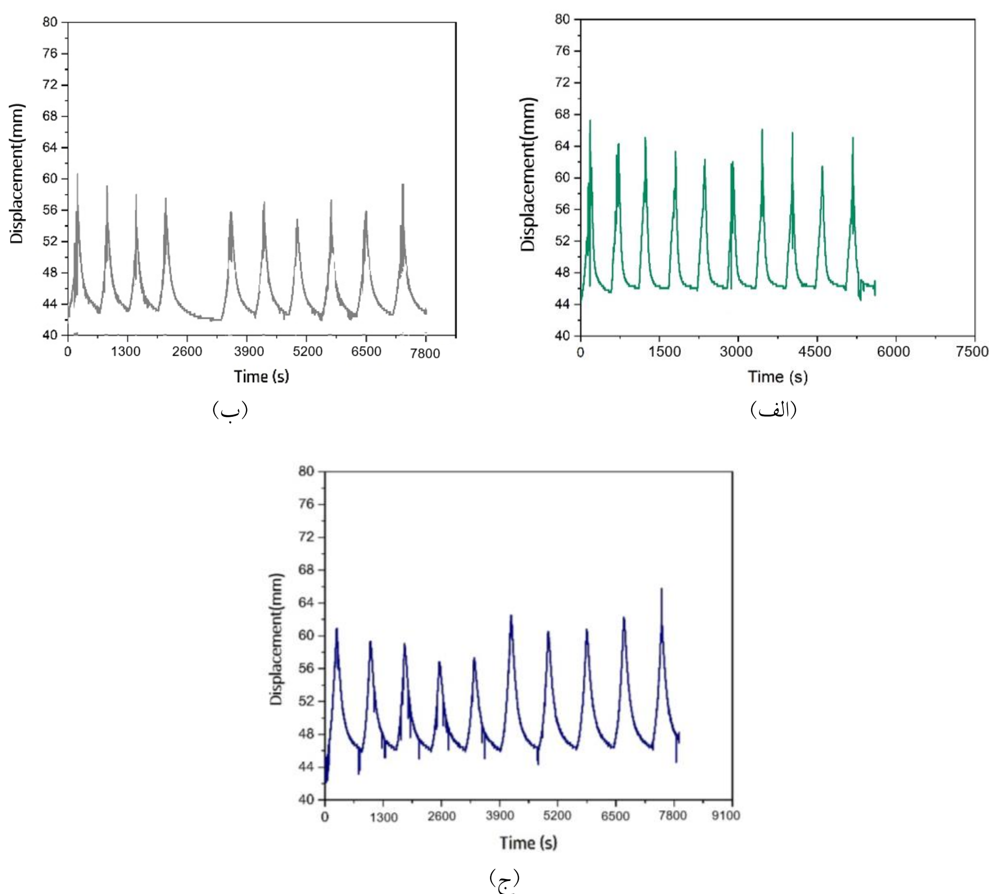
میزان جابه‌جایی در نظر گرفته شده برای این سه نمونه مقدار ۲۲ درصد طول اولیه در نظر گرفته شده است. نمودارهای جابه‌جایی بر حسب زمان برای سه نمونه در روز کاری سوم در شکل (۵) آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود افت عملکردی در سومین روز کاری برای هیچ یک از نمونه‌ها ثبت نشده است و مقدار ۲۲ درصد جابه‌جایی تا سیکل آخر برای تمامی نمونه‌ها وجود دارد. بنابراین میزان جابه‌جایی برای هر سه نمونه به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شده و میزان افت وزن، تخریب ساختار و سایر پارامترها برای نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳ میانگین زمان تحریک سه نمونه کامپوزیتی طی سه روز کاری اول، دوم و سوم



شکل ۴ منحنی افت وزن سه نمونه CPCM0.5 ، CPCM0.8 و CPCM1 طی سه روزکاری



شکل ۵ نمودار جابه‌جایی بر حسب زمان در روز کاری سوم: (الف) نمونه CPCM 0.5، (ب) نمونه CPCM 0.8، (ج) نمونه CPCM1

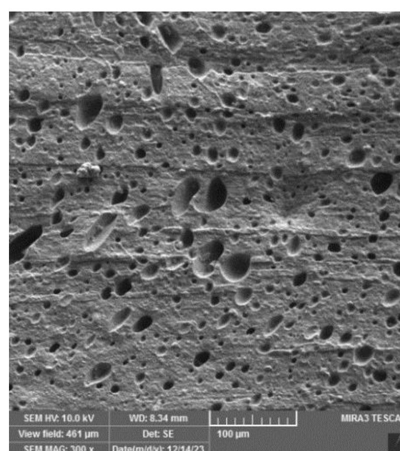
ارزیابی میکروسکوپی

میزان عیوب ایجاد شده در ریزساختار یکی از عوامل مهم افت وزن و خروج اتانول از ساختار طی سیکل‌های کاری متعدد می‌باشد. در شکل (۷) تصاویر میکروسکوپی FESEM از سطح مقطع برش خورده نمونه‌ها را نمایش داده است. تصاویر از قسمت مرکزی و بیرونی سیم‌پیچ سه نمونه بعد از سه روز کاری (۳۰ سیکل تحریک) تهیه شده است. تفاوت در ابعاد عیوب ایجاد شده در ساختار، بین دو نمونه CPCM 0.5 و CPCM 1 بسیار آشکار است. اندازه حفرات ایجاد شده در نمونه CPCM 0.5 در قسمت مرکزی با چشم کاملا قابل مشاهده است. این موضوع

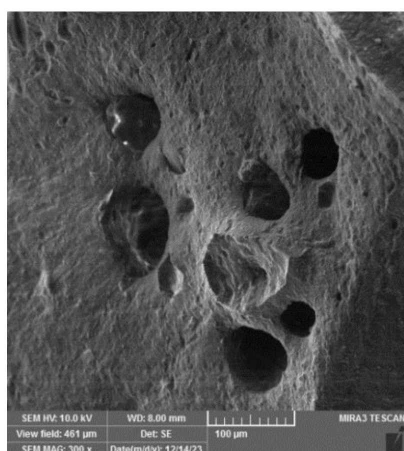
نشان می‌دهد تمرکز حرارتی قابل توجهی در قسمت مرکزی این نمونه باعث ایجاد عیوبی با اندازه بسیار بزرگ در ساختار کامپوزیت شده است. در واقع افزایش دمای ناحیه مرکزی تا دماهای بالاتر (۱۴۰°C) از نقطه جوش اتانول (۷۸°C) (نمودار شکل ۲–الف)، باعث ایجاد فشار بخاری بالا در قسمت مرکزی شده و سوراخ هایی به قطر ۱۱۱/۷۹ µm را در زمینه سیلیکونی ایجاد کرده است.

همان طور که در تصاویر میکروسکوپی نمونه CPCM1 مشاهده می‌شود، تفاوت آشکاری بین قطر حفرات در ناحیه مرکزی و ناحیه بیرونی سیم‌پیچ مشاهده نمی‌شود. داده‌های حاصل از تصاویر میکروسکوپی با داده‌های دمای نمونه ۳ (شکل ۲ ـ ج) کاملا قابل انطباق است. اختلاف دمای کم یا در واقع شیب حرارتی کم در قسمت مرکز و سطح نمونه CPCM1 و در واقع یکنواختی انتقال حرارت در این ساختار باعث کاهش میزان عیوب و یکنواختی ابعاد عیوب در ساختار شده است.

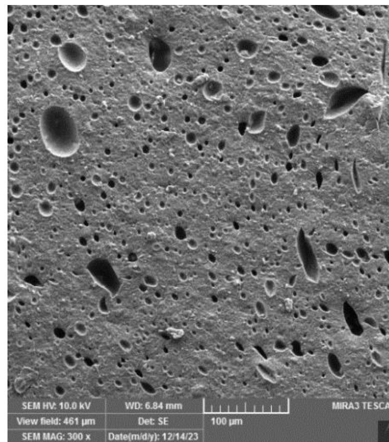
میانگین قطر حفرات در قسمت مرکزی نمونه CPCM0.5 و CPCM1 در نمودار شکل (۷) نمایش داده شده است. وجود یکنواختی در قطر حفرات ایجاد شده به معنی ایجاد توزیع یکنواخت حرارت در تمامی نقاط نمونه CPCM1 و ایجاد فشار بخار یکنواخت در ساختار است. تصاویر شکل (۶) به خوبی نشان می‌دهند که توزیع یکنواختی از حباب‌های اتانول بعد از اعمال جریان الکتریکی در ساختار نمونه CPCM1 باقی مانده است. میانگین قطر حفرات در قسمت مرکز این نمونه ۱۱/۶۲µm و در قسمت بیرونی سیم‌پیچ نیز ۹/۹۴µm است (شکل ۷) اما در نمونه CPCM0.5 به دلیل تمرکز حرارت در قسمت مرکزی نمونه، حفرات با ابعاد ۱۱۱/۷۹µm ایجاد شده است در صورتی که در نواحی بیرونی سیم‌پیچ حفراتی با ابعاد ۱۲/۴۲µm وجود دارد (شکل ۷).



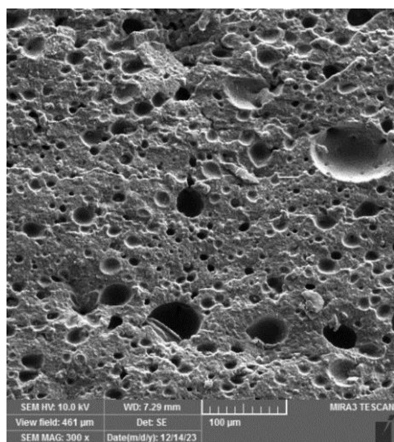
(الف)



(ب)

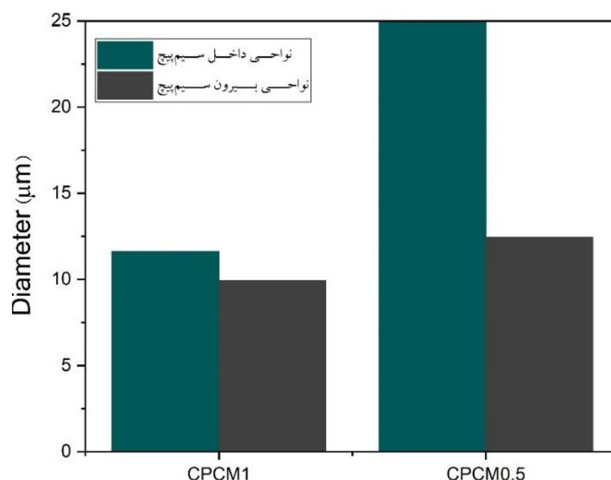


(ج)



(د)

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از سطح مقطع عرضی نمونه‌ها بعد از سه روز کاری: (الف) نواحی بیرونی سیم‌پیچ نمونهCPCM0.5، (ب) نواحی درونی سیم‌پیچ نمونه CPCM0.5 ، (ج) نواحی بیرونی سیم‌پیچ نمونه CPCM1 و (د) نواحی بیرونی سیم‌پیچ نمونه CPCM1



شکل ۷ میانگین قطر حفرات در نواحی مرکزی و بیرونی سیم‌پیچ نمونه‌های CPCM0.5 و CPCM1

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ربات نرم سیلیکونی با ماده تغییر فاز دهنده اتانول ساخته شد. از آنجایی که نحوه فعال‌سازی ماده تغییر فاز دهنده با جذب حرارت از یک منبع حرارتی است، بنابراین تأثیر منبع حرارتی و یکنواختی حرارت تولید شده در ساختار بر سرعت عملکرد، طول عمر ربات، عیوب ریزساختاری و میزان کرنش ایجاد شده در زمان مشخص مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که مقدار بهینه نسبت حجمی از ساختار که در داخل سیم‌پیچ قرار گرفته به حجم کل نمونه برابر ۳۴/۹٪ (نمونه CPCM1) می‌باشد. در این حالت ابعاد متوسط عیوب ایجاد شده در محدوده ۱۱/۶۲µm در مغز و ۹/۹۴µm سطح نمونه می‌باشد. حداکثر اختلاف دمای بین مغز و سطح نمونه CPCM1 برابر ۲۰ °C نشان‌دهنده یکنواختی توزیع حرارت است. شیب افت وزن نمونه CPCM1 کمتر از سایر نمونه‌ها است که نشان دهنده عملکرد یکنواخت نمونه طی سی سیکل کاری می‌باشد. در مقابل نمونه CPCM0.5 تفاوت قابل توجهی در ابعاد عیوب ایجاد شده در قسمت مرکزی و بیرونی سیم‌پیچ داشته و اندازه عیوب ایجاد شده در مغز و نواحی بیرون سیم‌پیچ این نمونه به ترتیب برابر با ۱۱۱/۷۹µm و ۱۲/۴µm اندازه‌گیری شد. میزان اختلاف دمای سطح و مغز نمونه CPCM0.5 بیشتر از سایر نمونه‌ها و برابر با ۹۵ °C بود.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] N. Kladovasilakis et al., “A Novel Soft Robotic Exoskeleton System for Hand Rehabilitation and Assistance Purposes,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 1, p. 553, 2023. https://doi.org/10.3390/app13010553

[2] Y. Wang et al., “Dielectric elastomer actuators for artificial muscles: A comprehensive review of soft robot explorations,” *Resources Chemicals and Materials*, vol. 1, no. 3, pp. 308–324, 2022. https://doi.org/10.1016/j.recm.2022.09.001

[3] D.-M. Rusu et al., “Soft Robotics: A Systematic Review and Bibliometric Analysis,” *Micromachines*, vol. 14, no. 2, p. 359, 2023. https://doi.org/10.3390/mi14020359

[4] E. W. Hawkes, C. Majidi, and M. T. Tolley, “Hard questions for soft robotics,” *Science Robotics*, vol. 6, no. 53, p. eabg6049, 2021. https://doi.org/10.1126/scirobotics.abg6049

[5] E. Mwasi, “Ethanol phase transition driven silicone actuator for soft robotic prosthetic arm,” Bachelor’s degree thesis,

2020.

[6] R. Nasseri et al., "Programmable nanocomposites of cellulose nanocrystals and zwitterionic hydrogels for soft robotics," *Nature Communications*, vol. 14, no. 1, p. 6108, 2023. https://doi.org/10.1038/s41467-023-41874-7

[7] M. Lalegani Dezaki et al., "Adaptive reversible composite-based shape memory alloy soft actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 345, p. 113779, 2022. https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113779

[8] X. Li, H. Duan, P. Lv, and X. Yi, "Soft actuators based on liquid–vapor phase change composites," *Soft Robotics*, vol. 8, no. 3, pp. 251–261, 2021. https://doi.org/10.1089/soro.2020.0018

[9] C. Liu et al., "High water content electrically driven artificial muscles with large and stable deformation for soft robots," *Chemical Engineering Journal*, vol. 472, p. 144700, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144700

[10] S. Vougioukas, "Agricultural robotics," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 365–392, 2019. https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023617

[11] D. J. Kang et al., "Programmable soft robotics based on nano-textured thermo-responsive actuators," *Nanoscale*, vol. 11, no. 4, pp. 2065–2070, 2019. https://doi.org/10.1039/C8NR08215D

[12] R. Chellattoan, A. Yudhanto, and G. Lubineau, "Low-voltage-driven large-amplitude soft actuators based on phase transition," *Soft Robotics*, vol. 7, no. 6, pp. 688–699, 2020. https://doi.org/10.1089/soro.2019.0150

[13] H. Ma, X. Xiao, X. Zhang, and K. Liu, "Recent advances for phase-transition materials for actuators," *Journal of Applied Physics*, vol. 128, no. 10, 2020. https://doi.org/10.1063/5.0020596

[14] G. Decroly, R. Raffoul, C. Deslypere, P. Leroy, L. Van Hove, A. Delchambre, and P. Lambert, "Optimization of phase-change material–elastomer composite and integration in kirigami-inspired voxel-based actuators," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 8, p. 672934, 2021. https://doi.org/10.3389/frobt.2021.672934

[15] A. Miriyev, G. Caires, and H. Lipson, "Functional properties of silicone/ethanol soft-actuator composites," *Materials & Design*, vol. 145, pp. 232–242, 2018. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.057

[16] S. Krpovic, K. Dam-Johansen, and A. L. Skov, "Importance of Mullins effect in commercial silicone elastomer formulations for soft robotics," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, no. 19, p. 50380, 2021. https://doi.org/10.1002/app.50380

[17] T. Kapłon and A. Milecki, "Research on the Use of Silicon-Ethanol Composite in Actuators," *Materials*, vol. 15, no. 23, p. 8570, 2022.

[18] T. Kapłon and A. Milecki, "Linear Drive Based on Silicon/Ethanol Composite," *Polymers*, vol. 13, no. 16, p. 2668, 2021. https://doi.org/10.3390/polym13162668

[19] D. J. Kang et al., "Programmable soft robotics based on nano-textured thermo-responsive actuators," *Nanoscale*, vol. 11, no. 4, pp. 2065–2070, 2019. https://doi.org/10.1039/C8NR08215D

[20] P. AziziHariri et al., "Development of a phase-change material-based soft actuator for soft robotic gripper functionality: In-depth analysis of material composition, ethanol microbubble distribution and lifting capabilities," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 311, p. 128435, 2024. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128435

[21] A. H. Ebrahimi et al., “Design and characterization of electro-active soft actuator based on phase transition of microencapsulated silicon-ethanol composite,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 37, no. 4, pp. 1499–1518, 2024. https://doi.org/10.1177/08927057231197160